

引文格式:康顺,陈军,彭舒.顾及栅格空间拓扑关系的地表覆盖时空目标不一致性探测方法[J].测绘学报,2019,48(6):767-779. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180346.

KANG Shun, CHEN Jun, PENG Shu. A topological relations-based inconsistency detection method for spatiotemporal land cover objects in raster space[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(6): 767-779. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2019.20180346.

顾及栅格空间拓扑关系的地表覆盖时空目标不一致性探测方法

康顺^{1,2}, 陈军², 彭舒²

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 国家基础地理信息中心, 北京 100830

A topological relations-based inconsistency detection method for spatiotemporal land cover objects in raster space

KANG Shun^{1,2}, CHEN Jun², PENG Shu²

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

Abstract: Land cover updates are key datasets in geographic national conditions monitoring, environmental change assessment, and ecological system protection. Remote sensing technology has become an important tool for an update of land cover datasets. However, as the complexity of spectrum, texture and temporal characteristics, omission and commission errors usually occur in land cover data, leading to the issue of spatiotemporal land cover object inconsistency. Currently, detection of land cover data inconsistency gives priority to manual inspection, and partial automation is implemented. In practice, a huge of workmen and time are needed in data inconsistency detection, lacking of an automated detection tool. The challenge of land cover data inconsistency detection in raster space is analyzed in this study. A logic quantifiers-based topological relationships calculation in raster space, the initial-judgment rules construction based on confidence interval, and a post-judgement using spatial multi-matching are proposed, forming a “relation-rule-judgment” detection system. Inconsistency detection of the GlobeLand30 datasets is conducted in study areas of Linqu and Kenli, Shandong, China. Comparing with statistics inconsistency detection, and taking remote sensing images as reference, the effectiveness of inconsistent land cover objects detected in update is validated, and this method is proved to be practically feasible.

Key words: land cover; inconsistency; topological relationships; rules; multi-matching; raster

Foundation support: The National Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Nos. 2016YFA0601500; 2016YFA0601503)

摘 要: 地表覆盖与更新是地理国情监测、环境变化评估、生态系统保护等不可或缺的基础地理信息。遥感制图技术已成为地表覆盖信息提取的重要手段,但因地物光谱、纹理及时相等特征复杂性,地表覆盖更新数据往往存在错分、漏分,从而导致地表覆盖时空目标不一致。现有地表覆盖更新数据不一致性探测主要以人工检查为主、部分自动化为辅的方式,生产实践中需要大量的作业人员与时间,缺乏行之有效的不一致性自动化探测工具。本文研究分析了栅格地表覆盖更新数据不一致性检查面临的挑战,提出了基于复合逻辑量词的栅格空间拓扑关系计算方法、基于置信区间的更新期地表覆盖错分目标初判规则构建,以及利用空间约束多重匹配的更新期错分目标后验判断,形成了“关系-规则-判断”的地表覆盖时空目标不一致性探测体系。试验以山东临朐、垦利 GlobeLand30 数据为研究对象,经与统计一致性检核方法对比分析、参照真实地表影像数据,实现了地表覆盖时空目标不一致性探测与有效性检

验,验证了探测方法可行性。

关键词:地表覆盖;不一致性;拓扑关系;规则;多重匹配;栅格

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1001—1595(2019)06—0767—13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0601500;2016YFA0601503)

地表覆盖空间分布及随时间的变化是地理国情监测、气候模拟、生态评估等不可或缺的重要基础信息,研制和提供多时相、高质量地表覆盖信息产品一直是国内外遥感与地理信息界的一项艰巨任务^[1-3]。利用遥感手段研制高质量地表覆盖数据产品是国内外的主流方法,但由于地物光谱、纹理、时相等特征复杂性,以及时相适宜、高质量影像数据获取难以保证,使得地表覆盖更新数据往往存在错分、漏分,严重影响了地表信息表达的准确性。保持地表覆盖时空目标一致性是确保地表覆盖更新数据逻辑一致性的内在要求。目标一致性检核的实质为约束条件匹配问题。通过目标空间关系与规则的比较判断是探测数据不一致性的主要研究方法^[4]。在地表覆盖更新数据的生产实践过程中,数据不一致性探测多以人工检查为主、部分自动化为辅的方式。作业员利用已有地表覆盖分布相关的遥感、地理和生态等多元知识,检核优化地表覆盖数据图幅类型不接边,地物信息提取完整性,地物错分、漏分,以及地物边界勾画准确性等,需要大量的人力与时间^[5-6]。为了满足地表覆盖数据产品质检的生产实践需求,降低人力、物力消耗,研究面向地表覆盖数据更新的不一致性自动化探测技术是生产高质量地表覆盖数据产品面临的一项重要需求与挑战。

近年来,国内外科研工作者对矢量数据不一致性探测进行了大量研究与实践,初步形成了较成熟的数据不一致性探测体系,并在矢量地形数据库更新中获得了大规模推广与应用^[7-8]。其中,空间关系计算主要以4交叉模型、9交叉模型,及V9交模型为主,实现点、线、面要素空间拓扑关系及其细化表达^[9-11]。规则构建上,文献^[12]根据数据模型规则、用户自定义规则、语义规则和点集拓扑规则相关理论,从空间数据结构、几何和语义拓扑3个层面,提出了矢量空间数据库的完整性约束分类模型。文献^[13]利用4交叉模型,通过关系统计发现了不同矢量图层中地理要素目标间的规则。文献^[14-15]建立了水体与等高线、水体与湿地的空间规则。数据不一致性判断上,地形数据库更新往往导致河流爬坡、等高线落水、

居民地落水等不一致性(或冲突),文献^[15]对此提出了一种拓扑链检核法,并应用于国家1:5万空间数据库质检。文献^[16]结合9交叉模型、用户自定义规则与具体说明,提出了一种结构化表达空间对象拓扑完整性约束法。文献^[17]利用桥梁与公路的距离、邻近桥梁的评定等级、桥面等级,研制了用于探测国家桥梁数据逻辑一致性的假设检验模型。面向工程生产实践,国家1:5万数据库更新工程根据基础地理数据模型对图形、属性、关系的规定与要求,建立了“规则—模型—方案”质检机制,形成了“方案—检查—核对—定位—修改—评价”一体化的数据质量控制流程^[7]。现有商业GIS软件ArcGIS、Feature Manipulate Engine和Oracle Spatial 10g仅提供了数据结构层面简单的几何和拓扑错误检测功能。

相比矢量数据不一致性探测研究,栅格数据不一致性探测研究主要有如下几类。

(1)面向像元级的多时序建模方法:文献^[18]设计了年际间土地类型转移矩阵,构建作物类型转变逻辑约束,探测农作物轮作信息提取不一致性;文献^[19]利用2000年、2001年和2002年3期影像数据研制2001年地表覆盖数据,通过构建最大后验马尔可夫随机场模型重分类2001期地表覆盖数据。

(2)辅助数据法:文献^[20]利用空间上下文掩膜,如水陆、城区与非城区、高地与低地,发现分类数据不一致性。

(3)采样点布设验证法:文献^[21]通过采样点的合理布设计算,验证采样点位置信息提取的准确性。

(4)统计一致性法:文献^[22]通过数据统计差异性判断数据是否一致。

(5)邻接关系修正法:文献^[23-24]利用地物的唯一性关系约束,例如沙滩与海水、挺水植被与水体,以及建筑物与阴影的邻近关系,提出了MSA(maximum spatial adjacency)和DSA(directional spatial adjacency)空间关系支持分类法,可检测出水体相邻的错分挺水植被,建筑物阴影相邻的错分建筑物。

研究分析实现地表覆盖栅格数据不一致性自动化检核所面临的关键问题有:①栅格空间目标不同于矢量数据的点、线、面状目标,栅格目标是属性值相同、邻近像素构成的集合,而且已有栅格空间拓扑关系研究侧重于多时序像素级、地表覆盖典型目标的简化邻近关系计算,多关注自动分类算法的改进,对栅格空间地表覆盖目标关系的精细化描述顾及不足;②规则构建上,已有地表覆盖目标的规则侧重典型地物的形式化表达,如水体与湿地、沙滩与海水,未能顾及地表覆盖全要素的目标对规则构建;③不一致性判断上,矢量地形数据不一致性探测是以矢量数据点、线、面目标的确定性空间关系约束为基础,而栅格地表覆盖数据不一致性判断则需要以栅格空间关系约束的形式化描述为基础。因此,系统化建立栅格空间地表覆盖目标的拓扑关系描述、地表覆盖目标对规则自动构建、目标不一致性判断是实现地表覆盖更新数据不一致性自动化探测面临的难题。

1 问题分析与研究思路

1.1 地表覆盖时空目标不一致性问题分析

在栅格地表覆盖数据更新中,由于地表覆盖数据错分、漏分,往往导致地表覆盖时空目标不一致性,其主要是指更新期地表覆盖目标与基准期地表覆盖目标在几何、类型约束条件下,更新期地表覆盖数据中的空间目标及其空间关系不符合自然、人文和生态规律,如湿地周边一般应存在水体、耕地分布区一般伴随有人造地表。如图1所示的2010期GlobeLand30局部示例,人造地表目标A的孔洞镶嵌有耕地目标B,参考同期Landsat743波段影像,不难发现该处耕地为错分地类,正确分类应为水体。根据冯·杜能的圈层结构理论,农业活动置于城市外圈层,一般不会出现于城市内部。但也不可排除一些特殊用地,如北京北三环皂君庙路附近中国农业科学院试验田,形成大城市内部存在耕地的特殊情形,如图2所示。由此,对单期地表覆盖更新数据而言,依据地表覆盖目标之间的空间关系判断目标一致性与否存在着不确定性。

由于空间不确定性,依据更新期地表覆盖目标的空间关系判断目标不一致性势必包含了因特殊用地而误判一致性地表覆盖目标。为了消除误判,通过引入时序邻近的基准期地表覆盖数据,消除不一致性判断的不确定性。如图3中圆圈处所

示的GlobeLand30更新期与基准期局部数据示例,若基准期与更新期目标在几何约束条件下不满足关系与类型一致性,则可判断其时空目标不一致;否则该时空目标一致,如图4十字丝处所示。据此,对更新期地表覆盖目标不一致性判断需与基准期地表覆盖目标做进一步的空间匹配加以确定。

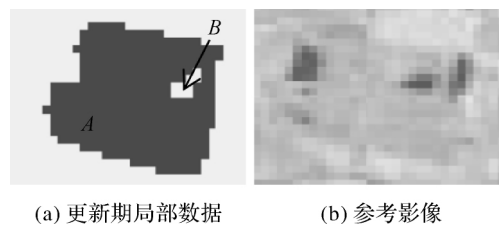


图1 单期水体目标错分

Fig.1 Waterbody misclassification in single period

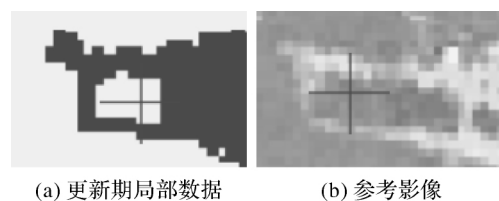


图2 单期耕地目标正确分类

Fig.2 Cultivated land correct classification in single period

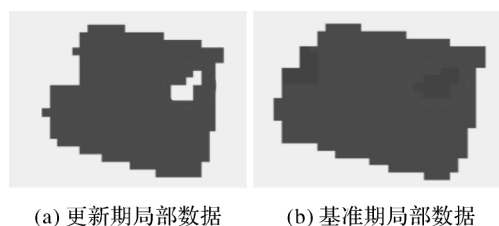


图3 两期目标不一致性

Fig.3 Spatial inconsistency in two-period

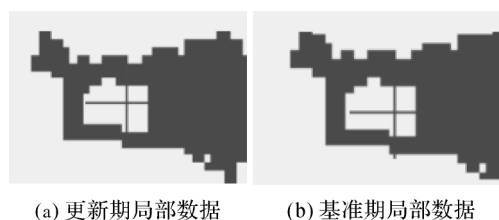


图4 两期目标一致

Fig.4 Spatial consistency in two-period

1.2 地表覆盖时空目标不一致性探测研究思路

经栅格地表覆盖目标的空间关系约束分析,

如图 5 所示,从图 5(a)所示的人造地表目标周边任一位置都不存在耕地目标,定义该栅格空间下的人造地表与耕地为相离关系;从图 5(b)所示的人造地表目标周边除了耕地,还有水体存在,细化该栅格空间相接关系为人造地表接壤耕地;从图 5(c)的人造地表目标周边任一位置有且仅有耕地,细化该栅格空间相接关系为耕地包围人造地表;图 5(d)所示的人造地表目标孔洞内镶嵌有且仅有耕地,细化该栅格空间相接关系为耕地被人造地表包围。由“有且仅有”、“存在”语义,根据目标地物邻域约束地物类型的存在与否,从栅格地表覆盖目标的周边目标约束类型出发,以栅格目标的一次膨胀作为目标周边,利用全称量词 \forall 与存在量词 \exists ,将矢量目标分解的外部、边界、内部相交计算转化为目标周边约束类型存在与否的逻辑判断,提出一种实现栅格地表覆盖简单面目标和带孔洞面目标的空间拓扑关系描述与计算方法。规则构建上,依据基准期地表覆盖目标空间关系发生频数的区域量化统计,通过置信区间的空间关联规则发现方法^[16],构建目标异常关联关系的不一致性初判规则。不一致性判断上,利用更新期与基准期地表覆盖目标空间约束多重匹配,包括语义、几何、空间关系,实现更新期地表覆盖目标不一致性后验判断,总体研究思路如图 6 所示。

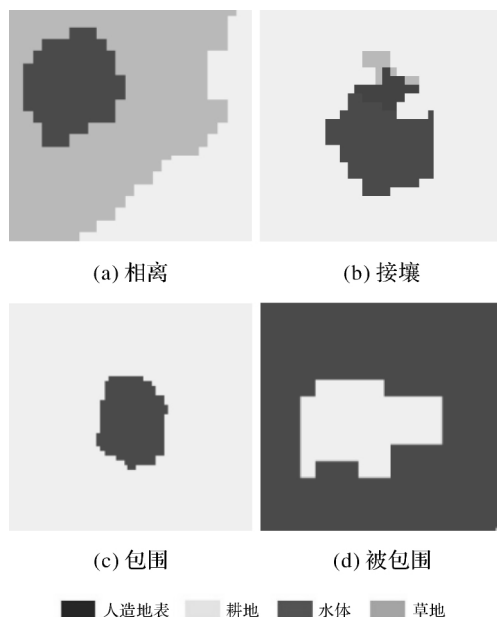


图 5 人造地表与耕地的空间关系细化

Fig.5 Spatial relationships refinement between artificial surface and cultivated land

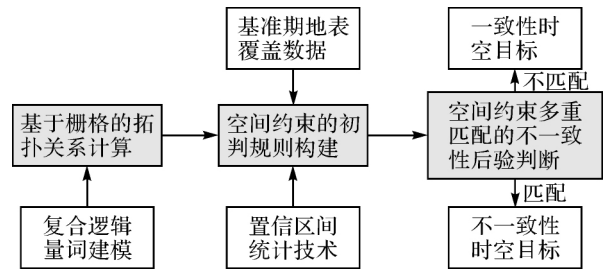


图 6 栅格地表覆盖时空目标不一致性探测框架

Fig.6 A framework of spatiotemporal land cover object inconsistency detection in raster space

2 主要计算方法

2.1 地表覆盖栅格空间拓扑关系计算

实现图 1(a)中目标 A 与 B 的栅格空间拓扑关系计算是自动化判断地表覆盖时空目标一致性与否的关键。由于矢量空间目标一维边界与栅格空间目标二维边界维度不同,矢量空间关系模型难以适用栅格空间关系计算。已有栅格空间关系模型主要有顾及目标边界模型,如文献[25—26]提出的 9 元组模型 I_{9r} ,如式(1)与图 7 所示

$$I_{9r} = \begin{bmatrix} \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap B^- \\ \partial A \cap B^- & A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap B^- \\ A^- \cap \partial B & A^- \cap B^\circ & A^- \cap B^- \end{bmatrix} \quad (1)$$

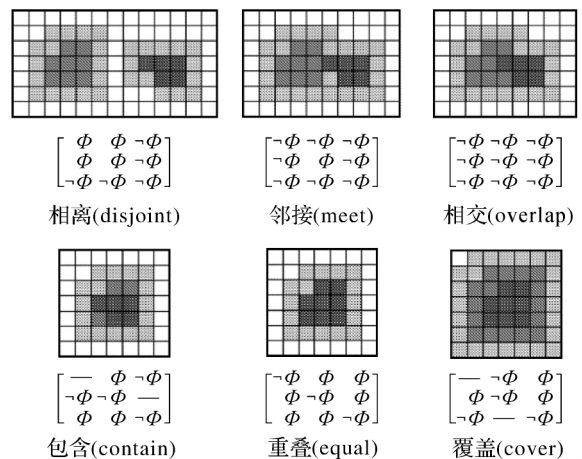


图 7 栅格空间 9 元组模型

Fig.7 9-tuple model in raster space

与文献[27]提出的无目标边界空间关系模型 I_{4r} ,如式(2)与表 1 所示

$$I_{4r} = \begin{bmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap B^c \\ A^c \cap B^\circ & A^c \cap B^c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, A° 表示属于区域 R 的图元集合; A^c 表示属于区域 R 的外部图元集合。

图 1(a)中的地表覆盖目标边界放大后如图 8

所示,对带孔洞的地表覆盖目标而言,其边界有内边界和外边界之分。经上述空间关系模型对图 1 中 B 镶嵌于 A 内部的空间关系计算,发现模型 I_{9r} 相接关系计算结果与其模型本身表达的相接关系不一致;模型 I_{4r} 的计算结果与其本身表达的相接关系虽一致,但当人造地表目标 A 与耕地目标 B 为图 5(a)所示的相离关系时,模型表达结果仍与此一致,无法区分空间相接与相离关系,计算结果如表 2 所示,表明该模型并不适用栅格地表覆盖目标拓扑关系表达。

表 1 I_{4r} 空间关系描述

Tab.1 Representation of spatial relationships by I_{4r}

拓扑关系	四元组表达
相离/相接	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$
相交	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$
相等	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
包含/覆盖	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
被包含/被覆盖	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$

究其原因,首先,基于 I_{9r} 、 I_{4r} 的模型多适用于简单面状目标,难以满足带孔洞的面状目标与简单面状目标空间关系计算需求;其次,地表覆盖栅格目标既有简单面状目标,又有带孔洞的面状目标,且带孔洞面状目标边界存在内边界和外边界之分。利用 I_{9r} 模型计算地表覆盖目标的拓扑关系时, I_{9r} 模型对带孔洞地表覆盖面状目标边界指代不明,难以适用地表覆盖简单面状目标与带孔洞面状目标的拓扑关系计算; I_{4r} 模型不能有效区分相离与相接关系、包含与覆盖关系、被包含与被覆盖关系;再次, I_{9r} 模型视栅格目标边界为 Jordan 曲线,4 邻域或 8 邻域形成的 Jordan 曲线往往导致 4 邻域或 8 邻域悖论^[28],表明 Jordan 曲线并不适用栅格目标边界表达。综上,迫切需要一种描述栅格地表覆盖目标拓扑关系方法。

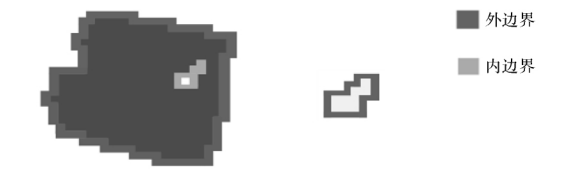


图 8 图 1(a)地表覆盖目标 A 与 B 的内外边界
Fig.8 Outer and inner boundaries of land cover objects A and B in figure 1(a)

表 2 模型相接关系表达差异性
Tab.2 Different representations of touch relationship based on models

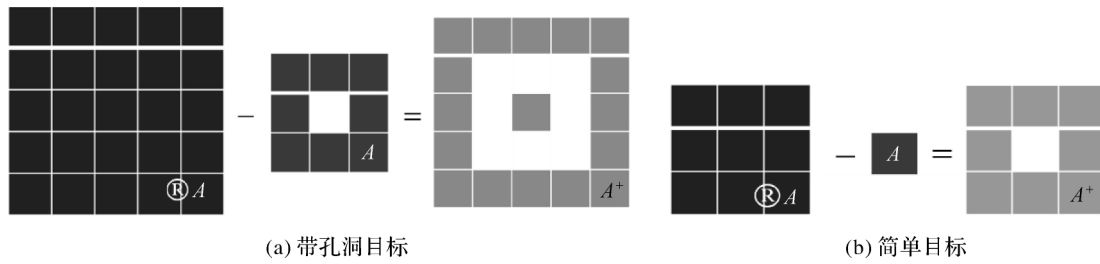
	I_{9r} 模型	I_{4r} 模型
模型相接关系表达	$\begin{bmatrix} \neg\Phi & \neg\Phi & \neg\Phi \\ \neg\Phi & \Phi & \neg\Phi \\ \neg\Phi & \neg\Phi & \neg\Phi \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$
图 1(a) B 与 A 的相接关系表达	$\begin{bmatrix} \Phi & \neg\Phi & \neg\Phi \\ \neg\Phi & \Phi & \neg\Phi \\ \Phi & \neg\Phi & \neg\Phi \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$

根据地表覆盖目标与其周边约束目标存在与否的逻辑判断,研究利用全称量词 \forall ,即指“全额”“每一个”“任意”“一切”等都在指定范围内,表示该范围内的全体对象或该指定范围整体含义的词,以及存在量词 \exists ,即指“有些”“至少有一个”“有一个”“存在”等表示个别或部分含义的词^[29-30],提出了复合逻辑量词的栅格空间拓扑关系描述方法,即复合逻辑量词模型(compound logic quantifier model, CLQM),如表达式(3)所示

$$CLQM = \begin{bmatrix} \forall v(A^+ \oplus B) == v(A) + v(B) \\ \forall v(B^+ \oplus A) == v(A) + v(B) \\ \exists v(A^+ \oplus B) == v(A) + v(B) \end{bmatrix} \quad (3)$$

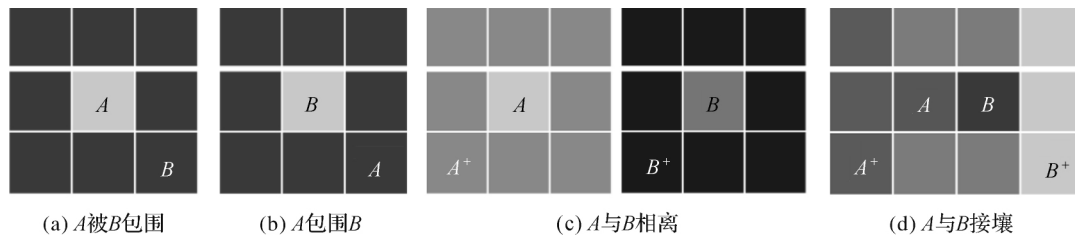
式中, A 、 B 指空间 8 邻域等值像素构建的地表覆盖目标; \oplus 指地图代数叠合相加算子; $v(\cdot)$ 指地表覆盖目标的地理编码; A^+ 、 B^+ 指目标 A 与 B 的周边,其可通过形态学一次膨胀算子 \otimes 计算获得,计算如图 9 所示。

根据逻辑真值 True(1)与 False(0)三元组,CLQM 能够表达 2^3 种空间拓扑关系,但某些关系表达并无实际意义。例如,若 $\forall v(A^+ \oplus B) == v(A) + v(B)$ 条件判断是 True,那么 $\exists v(A^+ \oplus B) == v(A) + v(B)$ 必定为 True。因此,归纳总结 $[1,1,0]^T$ 、 $[1,0,0]^T$ 、 $[1,1,1]^T$ 和 $[0,1,0]^T$ 是该栅格空间无实际意义的拓扑关系描述。若目标 A 和 B 是相离关系,那么它们的空间关系形式化描述为 $[0,0,0]^T$;若目标 A 和 B 是接壤关系,那么它们的空间关系形式化描述为 $[0,0,1]^T$;若目标 A 和 B 是包围关系,那么它们的空间关系形式化描述为 $[0,1,1]^T$;若目标 A 和 B 是被包围关系,它们的空间关系形式化描述为 $[1,0,1]^T$,这 4 种关系如图 10 所示。



(a) 带孔洞目标

(b) 简单目标

图 9 目标 A 与其周边 A^+ Fig.9 The target object A and its surrounding A^+ 

(a) A被B包围

(b) A包围B

(c) A与B相离

(d) A与B接壤

图 10 栅格地表覆盖目标空间拓扑关系

Fig.10 Topological relationships for land cover objects in raster space

利用地图代数算子与形态学膨胀算子,设计计算地表覆盖目标拓扑关系空间邻域搜索算法如下:

算法 1: 空间邻域搜索

输入: 栅格地表覆盖数据

输出: 关系描述三元组

(1) 计算过程名称: 栅格空间拓扑关系计算。

(2) 利用 8-邻域区域合并算子 $\mathfrak{R}^8(\cdot)$, 得地表覆盖目标集合 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\} \leftarrow \mathfrak{R}^8(\text{pixels})$ 。

(3) 对目标地物类型和参照地物类型, 利用地物类型匹配算子 $\text{SEO}(\cdot)$ 搜索并提取出目标地物类型集 $\text{Tob}[\] \leftarrow \text{SEO}_t(O)$, 参照地物类型集 $\text{Rob}[\] \leftarrow \text{SEO}_r(O)$ 。

(4) 对 Tob 中的每一个目标地物 Tob_i :

使用膨胀算子 $\otimes(\cdot)$ 将 Tob_i 膨胀为 ETob_i , $\text{ETob}[\] \leftarrow \otimes(\text{Tob})$ 。

(5) 对 Rob 中的每一个目标地物 Rob_i :

使用膨胀算子 $\otimes(\cdot)$ 将 Rob_i 膨胀为 ERob_i , $\text{ERob}[\] \leftarrow \otimes(\text{Rob})$ 。

(6) 利用地图代数 \oplus 对 $\text{Tob}_i, \text{ETob}_i, \text{Rob}_i, \text{ERob}_i$ 进行计算:

(6.1) 若 $\text{CLQM} = [\forall(\text{ERob}_i, \text{value} \oplus \text{Tob}_i, \text{value}) = \text{Rob}_i, \text{value} + \text{Tob}_i, \text{value}, \forall(\text{ETob}_i, \text{value} \oplus \text{Rob}_i, \text{value}) = \text{Rob}_i, \text{value} + \text{Tob}_i, \text{value}, \exists(\text{ERob}_i, \text{value} \oplus \text{Tob}_i, \text{value}) =$

$\text{Rob}_i, \text{value} + \text{Tob}_i, \text{value}]^T \rightarrow [1, 0, 1]^T$, 那么 Tob_i 与 Rob_i 是被包围关系;

(6.2) 若 $\text{CLQM} \rightarrow [0, 1, 1]^T$, 那么 Tob_i 与 Rob_i 是包围关系;

(6.3) 若 $\text{CLQM} \rightarrow [0, 0, 0]^T$, 那么 Tob_i 与 Rob_i 是相离关系;

(6.4) 若 $\text{CLQM} \rightarrow [0, 0, 1]^T$, 那么 Tob_i 与 Rob_i 是接壤关系。

(7) 算法结束。

2.2 地表覆盖时空目标不一致性初判规则构建

不一致性判定规则是指约束目标空间关系的法则。与可从现实世界中直接获取的地形要素约束关系相比, 如水系沿等高线爬坡、道路与居民地相交、居民地落水系等, 地表覆盖目标的不一致性判定规则往往难以获取, 如难以确定人造地表与耕地之间怎样的空间关系是合法关系或非法关系。因此, 本文基于文献[13]提出的置信区间统计法构建数据—数据的逻辑不一致性初判规则。在推断性统计学中, 置信区间是样本统计量对所估计参数的“可信程度”衡量, 参数真值估计不再是单纯的一个点, 而是一个区间。根据该理论^[31], 研究通过基准期地表覆盖目标的空间关系发生频数统计、设置置信区间获取单期地表覆盖目标关联规则; 计算每一对目标之间接壤、相离、包围和被包围关系发生频数, 见表 3。

表3 地表覆盖目标空间关系发生频数统计

Tab.3 Relation type frequency between neighboring patches

地类 i	关系类型 rel	地类 j	发生频数 fuc
P_{ik}	相离(disjoint)	P_{jk}	n_1
P_{ik}	接壤(connectwith)	P_{jk}	n_2
P_{ik}	被包围(surrounded-by)	P_{jk}	n_3
P_{ik}	包围(surround)	P_{jk}	n_4

累计形成空间关系频数统计直方图,如图11所示。

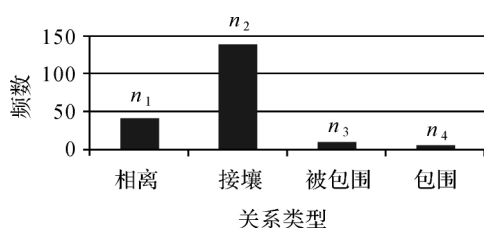


图11 地表覆盖目标 P_{ik} 与 P_{jk} 空间关系发生频数统计直方图

Fig. 11 Relation-type frequency histogram of land cover objects P_{ik} and P_{jk}

通过关系发生频数的加权均值、标准差计算,依据拉依达准则 $k\sigma$ 构建置信区间。由某一拓扑关系频数与置信区间的集合代数判断,构建基于关系约束的不一致性初判规则,其计算过程如算法2所示。

算法2:关系频数置信区间统计

输入:单期地表覆盖栅格数据

输出:地表覆盖目标空间约束关系

(1) 计算过程名称:空间约束关系提取。

(2) 对每一关系类型 rel_q ,统计计算地表覆盖目标 p_{ik} 与 p_{jk} 的发生频数 fuc_{ij}^q ($q = \text{connect with, disjoint, surround, surrounded-by}$)。

(3) 累计计算关系类型 rel_q 的发生总频数 $cn, cn \leftarrow \sum(fuc_{ij}^q)$ 。

(4) 统计计算地表覆盖目标 p_{ik} 与 p_{jk} 空间关系类型 rel_q 发生频数加权均值 $avg, avg \leftarrow \sum((fuc_{ij}^q)^2/cn)$ 。

(5) 计算地表覆盖目标 p_{ik} 与 p_{jk} 空间关系发生频数标准差 $std, std \leftarrow \{\sum(fuc_{ij}^q - avg)^2/(m - 1)\}^{1/2} (m = 4)$ 。

(6) 制定地表覆盖目标 p_{ik} 与 p_{jk} 空间关系发生频数 68.26% 的置信区间 $CI_{i-j}, CI_{i-j} \leftarrow (avg - std, avg + std)$ 。

(7) 对任一地表覆盖目标 p_{ik} 与 p_{jk} 的空间关

系类型 rel_q :

(7.1) 若 rel_q 的发生频数 fuc_{ij}^q 不属于置信区间 CI_{i-j} , $fuc_{ij}^q \notin CI_{i-j}$, 则关系 rel_q 为空间约束关系;

(7.2) 若 rel_q 的发生频数 fuc_{ij}^q 属于置信区间 CI_{i-j} , $fuc_{ij}^q \in CI_{i-j}$, 则关系 rel_q 为非空间约束关系。

(8) 算法结束。

利用逻辑谓词 (\wedge, \rightarrow)、空间谓词和集合谓词 (\in, \notin) 形式化描述不一致性初判规则,如式(4)、式(5)所示包围关系约束的初判规则

$$\begin{aligned} &is_a(x, i) \wedge is_a(y, j) \wedge \notin (fuc(surround(x, y))), \\ &CI_{i-j} \rightarrow is_a(surround(x, y), constraint)(p) \quad (4) \\ &is_a(x, i) \wedge is_a(y, j) \wedge is_a(surround(x, y), \\ &constraint) \rightarrow is_a(y, error))(p) \quad (5) \end{aligned}$$

式中, is_a 为分类谓词; x, y 表示地表覆盖目标; i, j 表示地表覆盖类型; $fuc(\cdot)$ 指关系发生频数; CI_{i-j} 指地表覆盖类型置信区间; $constraint$ 指约束关系标识; $error$ 指错分地类标识; p 指拉依达准则的置信度。

2.3 空间约束多重匹配的不一致性后验判断

首先,从单期地表覆盖数据角度,依据地表覆盖目标的空间关系与初判规则匹配判断出不一致性空间关系,如“耕地被人造地表包围”;其次,不排除“耕地被人造地表包围”关系正确的可能性,如北京联想桥附近的农科院耕地被周围的人造地表包围,基于该空间关系的时间连续性特征,即2000年该农科院耕地被人造地表包围,2010年该耕地仍然被人造地表包围。由此,研究从两期数据角度,利用空间拓扑关系的时间连续性,即2000年农科院耕地被人造包围,2010年该耕地仍然被人造包围,加之两期地表覆盖目标几何匹配、类型匹配,判定地表覆盖空间目标是否一致。

在单期栅格地表覆盖数据中,依据空间初判规则实现地表覆盖数据不一致性计算,视目标 A 为前景目标,其余目标为背景目标 B_{gr} ,如果目标类型 A 与目标类型 B 相离为不一致性约束关系,那么意味着目标 A 周边应存在有目标 B ,否则为不一致,其不一致性判断如式(6)所示

$$\neg \forall v(A^+ \oplus B_{gr}) = v(A) + v(B) \quad (6)$$

同理,若目标类型 A 与目标类型 B 接壤为不一致性约束关系,其不一致性判断如式(7)所示

$$\exists v(A^+ \oplus B_{gr}) = v(A) + v(B) \quad (7)$$

若目标类型 A 与目标类型 B 包围/被包围为不一致性约束关系,其不一致性判断如式(8)所示

$$\forall v(A^+ \oplus B_{gr}) = v(A) + v(B) \quad (8)$$

依据空间初判规则,不一致性初判探测结果分别以矢量数据点的形式予以标注,如图 12 所示。

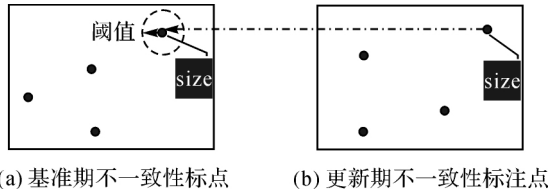


图 12 多重匹配探测不一致性

Fig.12 Multi-matching process for object inconsistency detection

结合更新期与基准期地表覆盖数据,若两期标注点的欧氏距离小于一定阈值 ϵ (关系匹配),且更新期目标 obj_i 与基准期目标 obj_j 几何面积相似、地表覆盖类型相等(几何约束与类型匹配),

计算如式(9)、式(10)所示,则删除更新期中的标注点,余下标注点为时空目标不一致性后验探测结果

$$\text{dis}(\text{labp}_i, \text{labp}_j) \leq \epsilon \quad (9)$$

$$\text{size}(\text{obj}_i, \text{obj}_j) \leq \xi \quad \text{s.t. } v(\text{obj}_i) = v(\text{obj}_j) \quad (10)$$

3 试验

3.1 试验区域

研究以山东临朐 2010 期 GlobeLand30 数据为例,结合 2000 基准期 GlobeLand30 数据,探测该区域地表覆盖数据不一致性。如图 13 所示,该区域包括 7 个地表覆盖类型,区域覆盖面积为 1.83×10^3 平方千米 (<http://www.globallandcover.com/GLC30Download/index.aspx>)。

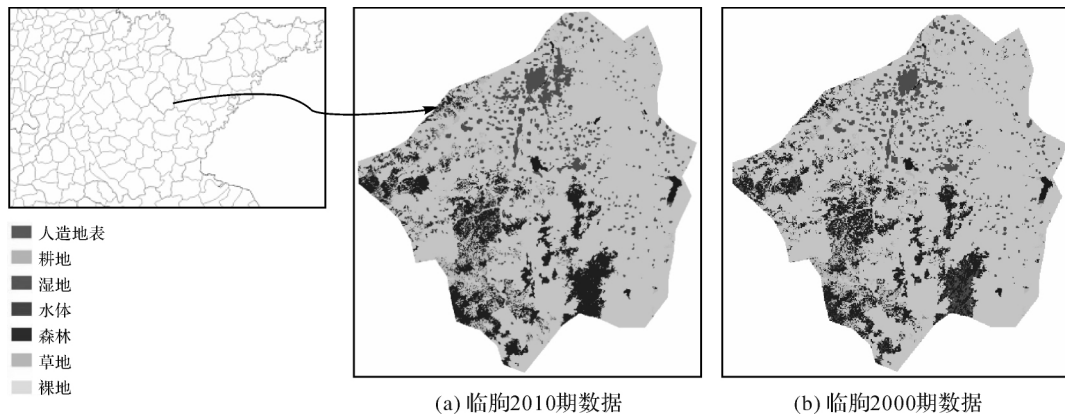


图 13 试验区域

Fig.13 Study area

3.2 不一致性探测结果

方法实现以 Microsoft Visual Studio 2010 为研发环境,利用 EsriArcEngine10.2、C# 语言开发设计。研究统计了山东临朐 2000 年基准期地表覆盖数据中每对地表覆盖目标类型的每一空间关系发生频数,利用关系频数置信区间统计算法²,构建地表覆盖目标空间关系发生频数统计直方图,如图 14 所示。经空间关系发生频数的加权均值与标准差计算、置信区间构建,判断某一空间关系类型发生频数是否在置信区间之内,若某一关系的发生频数属于置信区间,则为满足一定置信度的合法关联关系;若某一关系的发生频数不属于置信区间,则视其为不满足一定置信度的空间约束关系,构建不一致性初判规则。山东临朐

2000 期地表覆盖数据构建的不一致性初判规则如表 4 所示。

根据表 4 不一致性初判规则,判断地表覆盖更新数据不一致性,并对两期相应的不一致性目标位置予以标注,然后进行多重匹配后验判断。其中,选取距离阈值以栅格单元的 8 邻域为基准,即 ϵ 等于 $30\sqrt{2}$ m;面积阈值以面积重叠度 70% 为基准,数据不一致性探测结果如图 15 所示,该探测过程大约耗时 15 min。图 15(a)、(b)为表 4 规则 R02-人造地表包围耕地的不一致性探测结果示例;图 15(c)为表 4 规则 R12-人造地表接壤水体的不一致性探测结果示例;图 15(d)为表 4 规则 R03-人造地表接壤林地的不一致性探测结果示例。

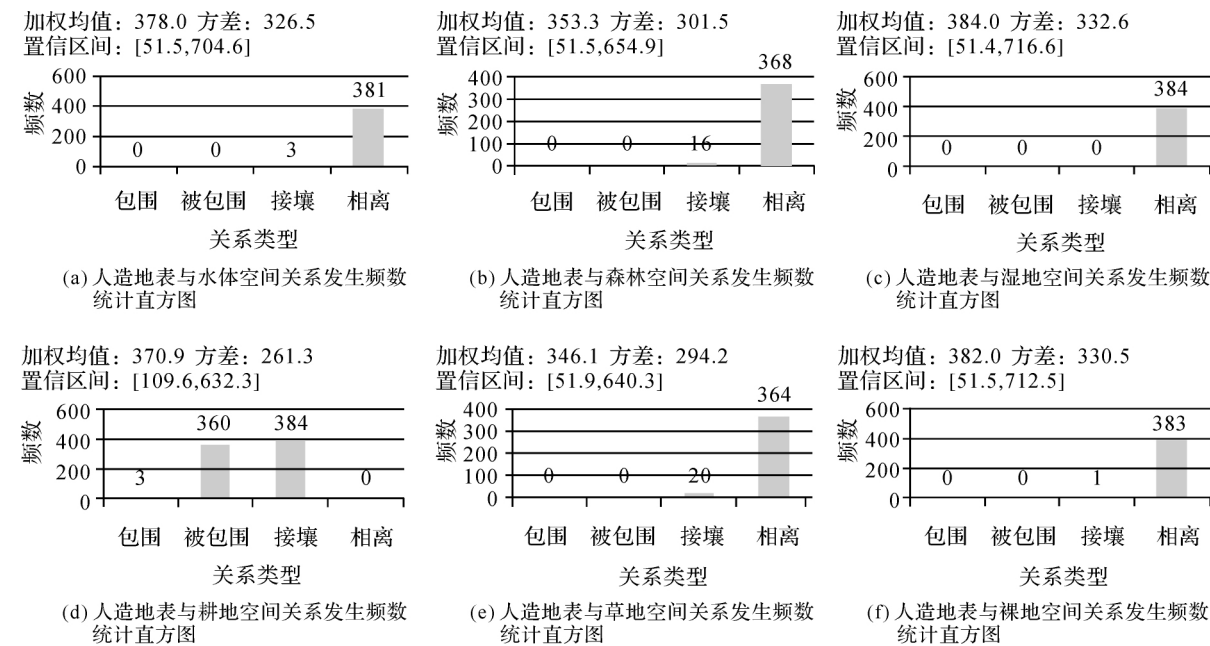


图 14 地表覆盖目标空间关系频数统计直方图

Fig.14 Statistical histograms of spatial relationships quantifying for land cover objects

表 4 人造地表参照的不一致性初判规则

Tab.4 Prejudgment rules for inconsistency detection referencing by artificial surface

Id	Rules
R01	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,10) \wedge is_a(disjoint(80,10),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R02	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,10) \wedge is_a(surround(80,10),constraint) \rightarrow is_a(10,error)(68.26\%)$
R03	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,20) \wedge is_a(connect\ with(80,20),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R04	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,20) \wedge is_a(surround(80,20),constraint) \rightarrow is_a(20,error)(68.26\%)$
R05	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,20) \wedge is_a(surrounded-by(80,20) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R06	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,30) \wedge is_a(connect\ with(80,30),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R07	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,30) \wedge is_a(surround(80,30),constraint) \rightarrow is_a(30,error)(68.26\%)$
R08	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,30) \wedge is_a(surrounded-by(80,30),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R09	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,50) \wedge is_a(connect\ with(80,50),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R10	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,50) \wedge is_a(surround(80,50),constraint) \rightarrow is_a(50,error)(68.26\%)$
R11	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,50) \wedge is_a(surrounded-by(80,50),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R12	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,60) \wedge is_a(connect\ with(80,60),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R13	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,60) \wedge is_a(surround(80,60),constraint) \rightarrow is_a(60,error)(68.26\%)$
R14	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,60) \wedge is_a(surrounded-by(80,60),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R15	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,90) \wedge is_a(connect\ with(80,90),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$
R16	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,90) \wedge is_a(surround(80,90),constraint) \rightarrow is_a(90,error)(68.26\%)$
R17	$is_a(x,80) \wedge is_a(y,90) \wedge is_a(surrounded-by(80,90),constraint) \rightarrow is_a(80,error)(68.26\%)$

3.3 对比分析与有效性检验

经统计一致性方法检核出的两期人造地表变化图斑如图 16 所示,发现该区域两期人造地表数据统计结果相差悬殊。相比图 15 本文方法探测结果,统计一致性检核结果存在大量椒盐状图斑,而且检验结果包含诸多伪变化图斑,如正确的新增人造地表。经对较大面积图斑(大于 6×6 像素)正确检测的个数统计,统计一致性检测的准确性约为 20%,其中准确性检核多为消失的人造地

表,表现为更新期人造地表错提了其他地表覆盖类型。对本文不一致性探测结果的有效性检验如图 17—图 20 所示。其中,图 17(b)是人造地表包围耕地的不一致性探测,参照图 17(c)所示的 Google Earth 影像,可看出存在道路错分耕地;图 18(b)十字丝处为人造错分耕地;图 19(b)为人造接壤水体的不一致性探测,参照图 19(c)可看出该处存在大面积的水体错分耕地;图 20(b)为人造地表接壤森林的不一致性探测,参照

图 20(c)可以看出该处存在人造地表错分草地、林地及其邻近耕地错分林地。

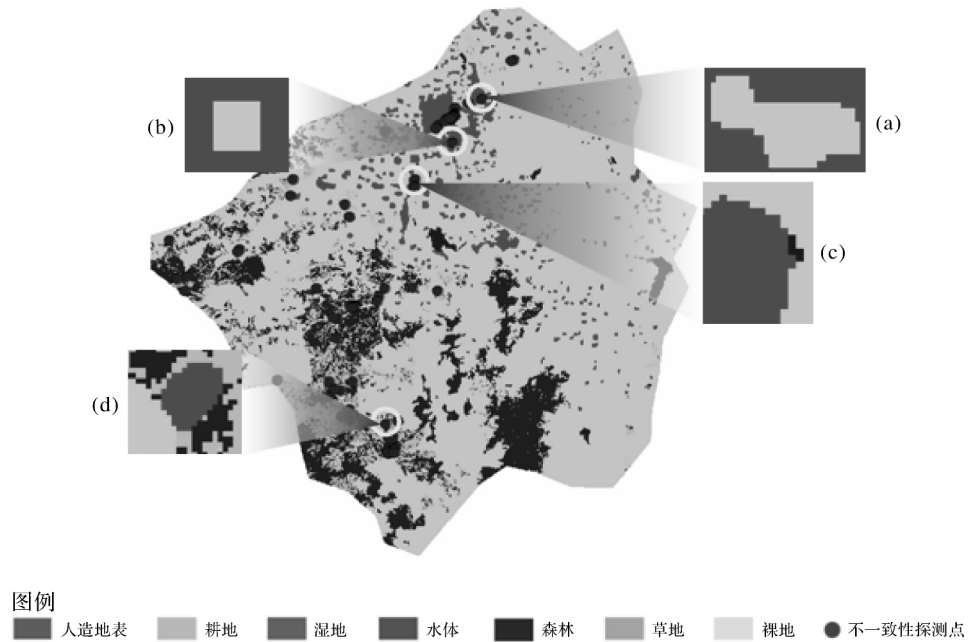


图 15 人造地表参照的不一致性探测结果

Fig.15 Results of data inconsistency detection referencing by artificial surface

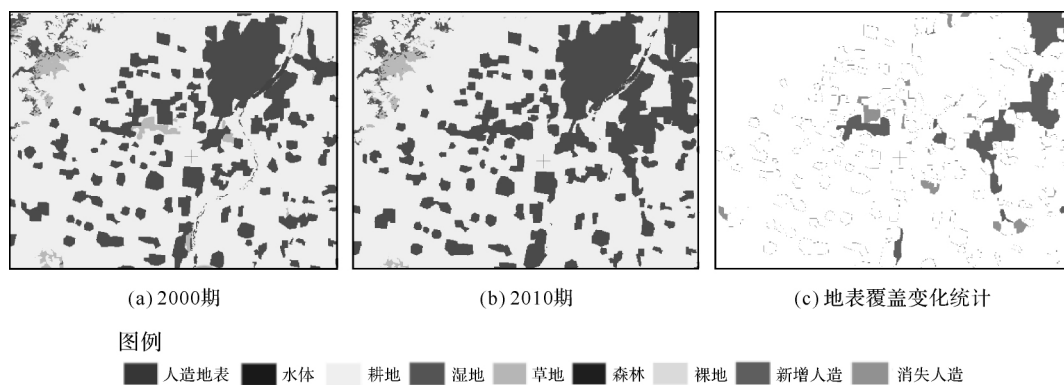


图 16 统计一致性检核结果

Fig.16 Results of statistics inconsistency detection

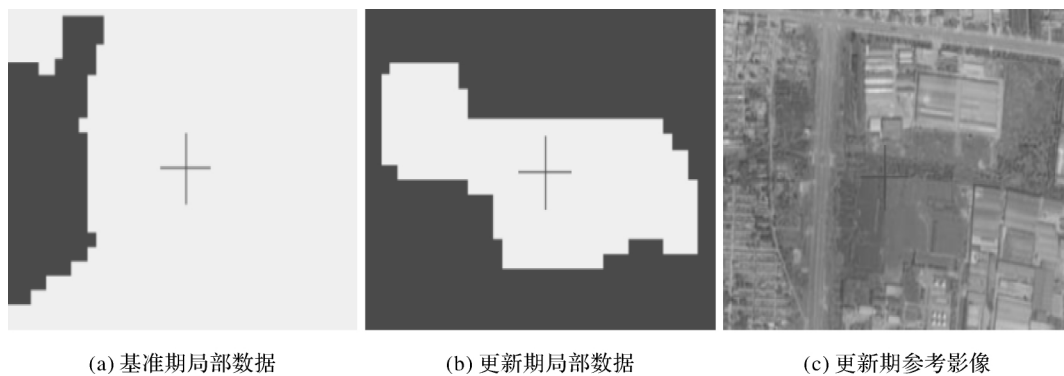


图 17 验证图 15(a)不一致性探测位置

Fig.17 Validation of inconsistency detection at location in Fig.15(a)

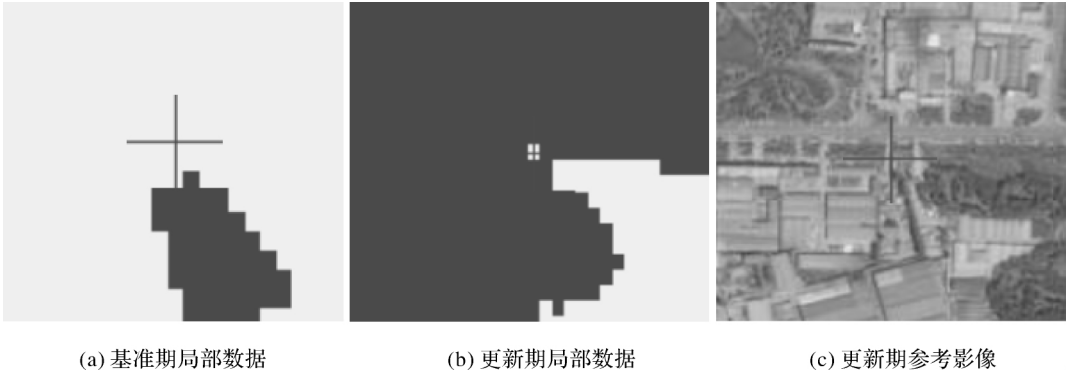


图 18 验证图 15(b)不一致性探测位置

Fig.18 Validation of inconsistency detection at location in Fig.15(b)

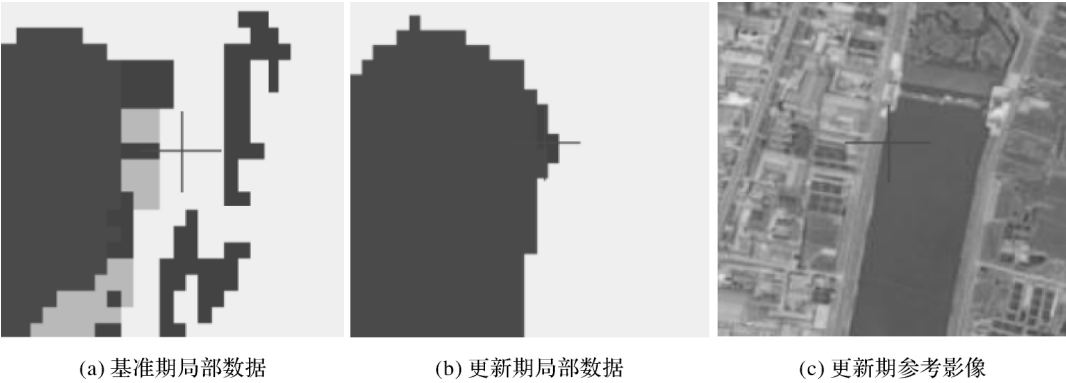


图 19 验证图 15(c)不一致性探测位置

Fig.19 Validation of inconsistency detection at location in Fig.15(c)

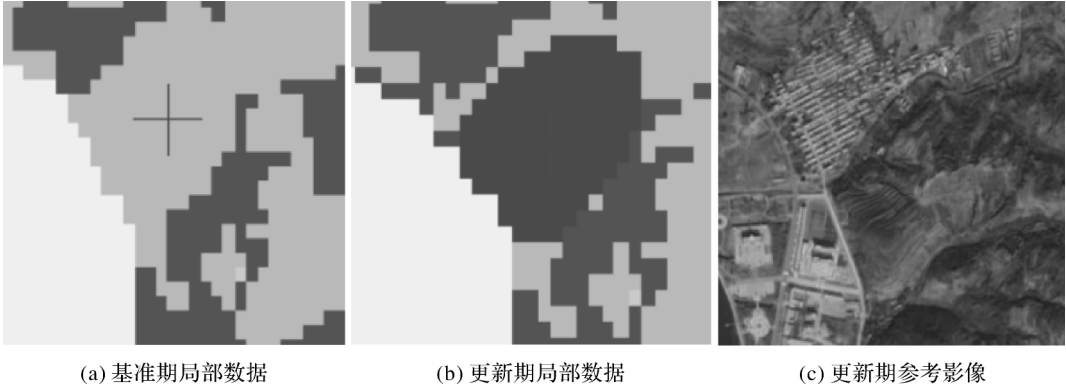


图 20 验证图 15(d)不一致性探测位置

Fig.20 Validation of inconsistency detection at location in Fig.15(d)

研究将正确的不一致性探测点数 CP 与总体不一致性探测点数 TP 之比作为不一致性探测有效性评估指标 EF , 如式(11)所示

$$EF=CP/TP\times100\% \quad (11)$$

经统计,该试验区的不一致性探测有效性为 77.3%。参照不一致性探测结果,经人工修正后,该区域地表覆盖数据质量精度提高了 8.5%。为

进一步验证本文探测方法的有效性,研究对山东垦利县 2010 期 GlobeLand30 数据(2.2×10^3 平方千米)不一致性进行探测与验证,如图 21 所示的人造地表包围耕地不一致性探测示例,并参照遥感影像验证了 2010 期探测的耕地是错分地类。参考不一致性探测结果,对修改前后的地表覆盖数据质量评估见表 5。

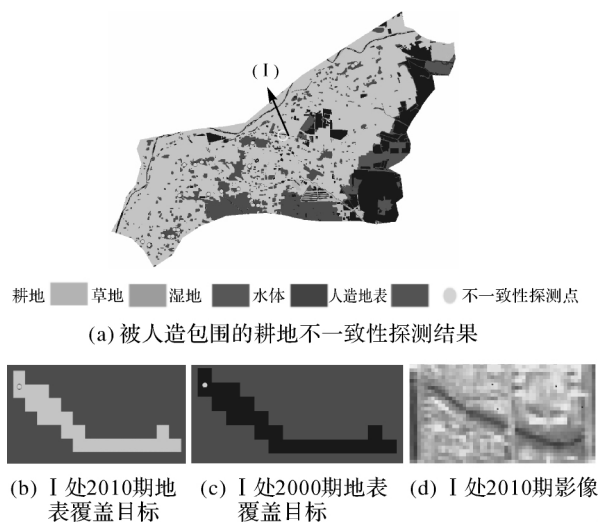


图 21 山东垦利县 GlobeLand30 局部数据不一致性探测与验证
Fig. 21 Local GlobeLand30 data inconsistency detection and validation for Kenli County, Shandong

表 5 试验区地表覆盖数据质量评估

Tab.5 Land cover data quality assessment of study areas (%)

试验区	数据质量(修改前)	数据质量(修改后)
山东临朐	79.6	88.1
山东垦利	81.2	87.3

4 结 论

栅格地表覆盖更新数据不一致性探测与矢量地形数据不一致性探测不同。首先,矢量空间目标的拓扑关系计算并不适用于栅格空间目标,而且由于地表覆盖目标的几何复杂性、栅格目标边界 Jordan 曲线表达邻域悖论,使得现有栅格空间关系模型难以适用地表覆盖目标的拓扑关系计算;在不一致性判断规则构建上,与典型地物要素的唯一性空间约束不同,利用空间约束判断地表覆盖错分目标具有不确定性。而且满足唯一性空间约束的地表覆盖目标少之又少,难以满足地表覆盖数据质检需求。

针对 GlobeLand30 数据质量检核工作中人工检核的耗时、耗力问题,提出了基于复合逻辑量词的空间拓扑关系描述方法,实现了地表覆盖目标相离、接壤、包围和被包围空间关系细化描述;统计了每对地表覆盖目标空间关系发生频数,建立了空间关系频数统计直方图,计算了加权均值和标准差,利用关系类型发生频数与置信区间集合代数法构建了基于置信区间的地表覆盖目标不

一致性初判规则;在初判规则先验判断结果基础上,利用地表覆盖时空目标几何大小、覆盖类型,及空间拓扑关系时间连续性匹配,后验判定了更新期错分目标,消除了先验判断不确定性。通过试验区地表覆盖更新数据不一致性探测试验与统计一致性检核方法对比分析,以真实地表遥感影像为参照,验证了该探测方法的有效性。经对不一致性探测数据目视解译、人工修改,提高了研究区地表覆盖数据质量、降低了人工检核作业量。但本文仅考虑了空间关系,未顾及时间维度下地表覆盖类型之间的时序动态变化因素,为完善地表覆盖更新数据不一致性探测,综合时态关系探测地表覆盖更新数据不一致性是下一步工作中需研究解决的问题。

参考文献:

- [1] COMBER A, FISHER P, WADSWORTH R. What is land cover? [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2005, 32(2): 199-209.
- [2] FISHER P, COMBER A, WADSWORTH R. Land use and land cover: contradiction or complement[M]. FISHER P, UNWIN D.J. Re-Presenting GIS. Hoboken: John Wiley and Sons Ltd, 2005: 85-98.
- [3] 陈军, 陈晋, 廖安平. 全球地表覆盖遥感制图[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
CHEN Jun, CHEN Jin, LIAO Anping. Remote sensing-based global land cover mapping [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [4] 刘万增, 陈军, 邓喀中, 等. 线目标空间冲突自动检测方法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6): 767-771.
LIU Wanzeng, CHEN Jun, DENG Kazhong, et al. Automatic detection of spatial conflicts between line objects[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(6): 767-771.
- [5] ZHANG Weiwei, CHEN Jun, LIAO Anping, et al. Geo-spatial knowledge-based verification and improvement of GlobeLand30[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(9): 1709-1719.
- [6] 刘吉羽, 彭舒, 陈军, 等. 基于知识的 GlobeLand30 耕地数据质量检查方法与工程实践[J]. 测绘通报, 2015(4): 42-48. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2015.0108.
LIU Jiyu, PENG Shu, CHEN Jun, et al. Knowledge based quality checking method and engineering practice of GlobeLand30 crop data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(4): 42-48. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2015.0108.
- [7] 陈军, 王东华, 商瑶玲, 等. 国家 1:50 000 数据库更新工程总体设计研究与技术创新[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 7-10.
CHEN Jun, WANG Donghua, SHANG Yaoling, et al. Master

- design and technical development for national 1 : 50 000 topographic data-base updating engineering in China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 7-10.
- [8] COCKCROFT S. A taxonomy of spatial data integrity constraints[J]. *GeoInformatica*, 1997, 1(4): 327-343.
- [9] CHEN Jun, LI Chengming, LI Zhilin, et al. A voronoi-based 9-intersection model for spatial relations[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2001, 15(3): 201-220.
- [10] 李靖涵. 居民地增量更新中空间冲突检测与处理方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2015.
- LI Jinghan. Research on Automatic Detection and Processing of Spatial Conflict in the Process of Settlement Incremental Updating[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2015.
- [11] 任艳. 空间拓扑一致性维护研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2007.
- REN Yan. Researches on spatial topological consistent maintenance[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2007.
- [12] SERVIGNE S, UBEDA T, PURICELLI A, et al. A methodology for spatial consistency improvement of geographic databases[J]. *GeoInformatica*, 2000, 4(1): 7-34.
- [13] GADISH D A. Inconsistency detection and adjustment of spatial data using rule discovery[D]. Guelph: University of Guelph, 2001: 42-59.
- [14] 蔡晓斌, 陈晓玲, 王涛, 等. 基于图斑空间关系的遥感专家分类方法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(4): 321-324.
- CAI Xiaobin, CHEN Xiaoling, WANG Tao, et al. Remote sensing expert classification method based on patch spatial relationship[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(4): 321-324.
- [15] CHEN J, LIU W, LI Z, et al. Detection of spatial conflicts between rivers and contours in digital map updating[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2007, 21(10): 1093-1114.
- [16] UBEDA T, EGENHOFER M J. Topological error correcting in GIS [C] // *Proceedings of Advances in Spatial Databases*, 5th International Symposium. Berlin: Springer, 1997: 283-297.
- [17] DIN Z U, TANG Pingbo. Automatic logical inconsistency detection in the national bridge inventory[J]. *Procedia Engineering*, 2016(145): 729-737.
- [18] MUELLER-WARRANT G W, SULLIVAN C, ANDERSON N, et al. Detecting and correcting logically inconsistent crop rotations and other land-use sequences[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(S1): 29-59.
- [19] WANG Jie, ZHAO Yuanyuan, LI Congcong, et al. Mapping global land cover in 2001 and 2010 with spatial-temporal consistency at 250 m resolution[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015(103): 38-47.
- [20] GROOM G B, FULLER R M, JONES A R. Contextual correction: techniques for improving land cover mapping from remotely sensed images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(1): 69-89.
- [21] STEHMAN S V. Sampling designs for accuracy assessment of land cover[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(20): 5243-5272.
- [22] CONGALTON R G. Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, 10(4): 321-328.
- [23] 乔程, 沈占锋, 吴宁, 等. 空间邻接支持下的遥感影像分类[J]. *遥感学报*, 2011, 15(1): 88-99.
- QIAO Cheng, SHEN Zhanfeng, WU Ning, et al. Remote sensing image classification method supported by spatial adjacency[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(1): 88-99.
- [24] QIAO Cheng, WANG Jinfei, SHANG Jiali, et al. Spatial relationship-assisted classification from high-resolution remote sensing imagery [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2015, 8(9): 710-726.
- [25] EGENHOFER M J, FRANZOSA R D. Point-set topological spatial relations[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991, 5(2): 161-174.
- [26] 夏慧琼, 李德仁, 郑春燕. R^2 空间栅格区域拓扑关系描述[J]. *测绘通报*, 2008(2): 1-3.
- XIA Huiqiong, LI Deren, ZHENG Chunyan. Description of topological relations between raster regions in R^2 [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2008(2): 1-3.
- [27] WINTER S, FRANK A U. Topology in raster and vector representation[J]. *GeoInformatica*, 2000, 4(1): 35-65.
- [28] KONG T Y, ROSENFELD A. Digital topology: introduction and survey [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1989, 48(3): 357-393.
- [29] 张留华. 皮尔士与量词[J]. *华东师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2002, 34(4): 37-42.
- ZHANG Liuhua. Peirce and quantifier[J]. *Journal of East China Normal University (Philosophy and Social Sciences)*, 2002, 34(4): 37-42.
- [30] STEVENSON L. Frege's two definitions of quantification[J]. *The Philosophical Quarterly*, 1973, 23(92): 207-223.
- [31] DIEZ D M, BARR C D, ÇETINKAYA-RUNDEL M. *OpenIntroStatistics*[M]. [S.l.]: OpenIntro, 2015.

(责任编辑: 张艳玲)

收稿日期: 2018-07-16

修回日期: 2019-02-14

第一作者简介: 康顺(1987—),男,博士生,研究方向为时空关系建模与计算。

First author: KANG Shun(1987—), male, PhD candidate, majors in spatiotemporal relationships modelling and computing.

E-mail: kangshun_cumt@126.com